

## Transformator tenaga – Bagian 2: Kenaikan suhu



© BSN 2004

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang menyalin atau menggandakan sebagian atau seluruh isi dokumen ini dengan cara dan dalam bentuk apapun dan dilarang mendistribusikan dokumen ini baik secara elektronik maupun tercetak tanpa izin tertulis dari BSN

BSN  
Gd. Manggala Wanabakti  
Blok IV, Lt. 3,4,7,10.  
Telp. +6221-5747043  
Fax. +6221-5747045  
Email: [dokinfo@bsn.go.id](mailto:dokinfo@bsn.go.id)  
[www.bsn.go.id](http://www.bsn.go.id)

Diterbitkan di Jakarta



## Daftar isi

Daftar isi.....	i
Prakata .....	ii
Pendahuluan .....	iii
1 Ruang lingkup.....	1
2 Acuan normatif.....	1
3 Simbol identifikasi sesuai dengan metode pendinginan .....	1
4 Batas kenaikan-suhu .....	2
4.1 Umum .....	2
4.2 Batas kenaikan-suhu normal pada daya pengenalan kontinu .....	3
4.3 Persyaratan yang diubah karena kondisi pelayanan yang tidak normal.....	4
4.4 Kenaikan-suhu selama siklus beban yang ditentukan .....	5
5 Uji kenaikan-suhu .....	6
5.1 Umum .....	6
5.2 Metode uji untuk penentuan kenaikan-suhu .....	7
5.3 Penentuan suhu minyak .....	9
5.4 Penentuan suhu belitan rata-rata .....	10
5.5 Penentuan suhu belitan sebelum pemutusan.....	11
5.6 Koreksi.....	11
Lampiran A Catatan pada suhu minyak dalam transformator dengan sirkulasi minyak paksa .....	13
Lampiran B Pembebanan transien-Model matematik dan pengujian .....	14
Lampiran C Teknik yang digunakan dalam pengujian kenaikan-suhu dari transformator terendam - minyak.....	19



## Prakata

Standar Nasional Indonesia (SNI) "Transformator tenaga – Bagian 2: Kenaikan suhu, di adopsi dari Standar *International Electrotechnical Commission* (IEC) 60076-2 (1993-04) "*Power transformers*".

SNI ini dirumuskan oleh Panitia Teknik Transformator (PTTR), standar ini telah melalui proses/prosedur perumusan standar dan terakhir dibahas dalam Konsensus XXII pada tanggal 11 sampai dengan 13 Nopember 2003 di Jakarta untuk mencapai mufakat.





## Transformator tenaga – Bagian 2: Kenaikan suhu

### 1 Ruang lingkup

Bagian 2 dari standar ini, mengidentifikasikan transformator sesuai dengan metode pendinginannya, mendefinisikan batas kenaikan-suhu dan rincian metode uji untuk penentuan kenaikan-suhu. Standar ini berlaku untuk transformator sebagaimana ditentukan dalam ruang lingkup SNI 04-6954.1-2003 Transformator tenaga – Bagian 1: Umum.

### 2 Acuan normatif

Dokumen normatif berikut berisi ketentuan yang menggunakan acuan pada naskah ini, yang merupakan ketentuan dari standar ini. Pada waktu dipublikasikan, edisi tersebut, masih berlaku. Semua dokumen normatif yang akan direvisi dan pihak-pihak yang bersepakat berdasarkan standar ini dianjurkan untuk menyelidiki kemungkinan penerapan dari dokumen normatif edisi terbaru yang ditunjukkan di bawah ini. Anggota-anggota IEC dan ISO tetap mencatat kelangsungan Standar Internasional yang berlaku.

IEC 76-1:1993, *Power transformers - Part 1 : General*

IEC 85:1984, *Thermal evaluation and classification of electrical insulation*

IEC 279:1969, *Measurement of the winding resistance of an a.c machine during operation at alternating voltage*

IEC 354:1991, *Loading guide for oil-immersed power transformers*

IEC 606:1978, *Application guide for power transformers*

IEC 726:1982, *Dry-type power transformers*

IEC 905: 1987, *Loading guide for dry – type power transformer*

ISO 2592:1973, *Petroleum products – Determination of flash and fire points-Cleveland open-cup method*

### 3 Simbol identifikasi sesuai dengan metode pendinginan

Transformator harus diidentifikasi sesuai dengan metode pendinginan yang digunakan. Untuk transformator terendam-minyak identifikasi ini dinyatakan dengan kode empat-huruf seperti diuraikan di bawah. Kode yang bersesuaian untuk transformator jenis-kering diberikan dalam SNI 04-3870-1995, Pedoman penerapan untuk transformator tenaga.

*Huruf pertama* : Media pendingin internal yang berhubungan dengan belitan :

- 0 minyak mineral atau cairan isolasi sintetik dengan titik nyala  $\leq 300^{\circ}\text{C}$ ;
- K cairan isolasi dengan titik nyala\*  $> 300^{\circ}\text{C}$ ;
- L cairan isolasi dengan titik nyala tidak dapat diukur.

\* Metode uji "Cleveland open-cup", lihat ISO 2592.

*Huruf kedua* : Mekanisme sirkulasi untuk media pendinginan internal.

- N aliran pemindah panas alami melalui perlengkapan pendingin dan di dalam belitan;
- F sirkulasi paksa melalui perlengkapan pendingin, aliran pemindah panas di belitan;



## SNI 04-6954.2-2004

D sirkulasi paksa melalui perlengkapan pendingin, langsung dari perlengkapan pendingin sekurang-kurangnya ke dalam belitan utama.

*Huruf ketiga* : Media pendingin eksternal

A Udara

W air

*Huruf keempat* : Mekanisme sirkulasi untuk media pendingin eksternal

N konveksi alami

F sirkulasi paksa (kipas, pompa)

**CATATAN** Pada transformator yang ditandai seperti yang mempunyai sirkulasi minyak langsung paksa (kode huruf kedua D), kecepatan aliran minyak yang melalui belitan utama ditentukan oleh pompa utama dan pada prinsipnya tidak ditentukan berdasarkan pembebanan. Sebagian kecil dari aliran minyak melalui perlengkapan pendingin dapat langsung sebagai suatu pintas terkendali untuk melengkapi pendingin inti dan bagian-bagian luar lainnya diluar belitan utama. Belitan pengatur dan/atau belitan lain yang mempunyai daya rendah relatif dapat juga mempunyai sirkulasi tidak langsung dari minyak pintas.

Pada transformator dengan pendingin paksa dan pendingin tidak langsung, pada sisi lain (kode huruf kedua F), kecepatan aliran minyak melalui semua belitan bervariasi dengan pembebanan dan tidak langsung berhubungan dengan aliran yang dipompakan melalui perlengkapan pendingin.

Transformator dapat dispesifikasikan dengan metode pendinginan alternatif. Spesifikasi dan pelat nama harus memuat informasi tentang nilai daya dimana transformator memenuhi batas kenaikan-suhu jika alternatif ini digunakan, lihat pasal 7.1 m) dari SNI 04-6954.1-2003, Transformator tenaga – Bagian 1: Umum. Nilai daya untuk alternatif kapasitas pendinginan tertinggi adalah daya pengenalan transformator tersebut (atau dari belitan masing-masing transformator multi-belitan; lihat pasal 4.1 dari SNI 04-6954.1-2003. Alternatif pendinginan tersebut terdaftar sesuai dengan tingkat kenaikan kapasitas pendinginan.

### CONTOH

ONAN/ONAF. Transformator mempunyai seperangkat kipas yang dapat dioperasikan pada saat diperlukan pada pembebanan yang tinggi. Sirkulasi minyak pada kedua hal tersebut adalah hanya dengan efek pemindahan panas (thermosiphon).

ONAN/OFAF. Transformator mempunyai perlengkapan pendingin dengan pompa dan kipas tetapi dispesifikasikan juga dengan kapasitas daya berkurang pada pendinginan alami ( misalnya, dalam hal gagalnya suplai daya-alat bantu ).

## 4 Batas kenaikan-suhu

### 4.1 Umum

Pembatasan kenaikan-suhu untuk transformator dispesifikasikan sesuai dengan pilihan yang berbeda.

- Sejumlah persyaratan diterapkan dengan mengacu kepada daya pengenalan kontinu. Persyaratan ini diberikan pada 4.2.
- Apabila dispesifikasikan terpisah, sejumlah persyaratan tambahan dikenakan yang dikaitkan dengan siklus pembebanan tertentu. Prosedur ini diuraikan pada 4.4. Prosedur ini dapat diterapkan terutama untuk transformator sistem besar yang kondisi



pembebanan daruratnya patut mendapat perhatian khusus, dan tidak digunakan secara tetap untuk transformator standar ukuran kecil dan menengah.

Dalam SNI ini diasumsikan bahwa suhu pelayanan bagian yang berbeda dari transformator masing-masing dapat diuraikan sebagai jumlah dari suhu media pendingin (udara sekitar atau air pendingin) dan kenaikan suhu bagian transformator.

Suhu media pendingin dan ketinggian (dengan memperhatikan kerapatan udara pendingin) adalah merupakan karakteristik lokasi pemasangan. Apabila kondisi pelayanan normal pada kondisi ini berpengaruh, lihat pasal 2.1 dari SNI 04-6954.1-2003, selanjutnya nilai kenaikan-suhu normal akan diperoleh pada suhu pelayanan yang diizinkan.

Nilai kenaikan-suhu adalah merupakan karakteristik transformator yang menentukan jaminan dan pengujian pada kondisi yang ditentukan. Batas kenaikan-suhu normal diterapkan jika pada permintaan keterangan dan kontrak tidak menyatakan pelayanan diluar normal. Pada keadaan demikian batas kenaikan suhu harus diubah seperti yang dinyatakan pada 4.3.

Tidak ada toleransi plus yang diizinkan pada batas kenaikan-suhu.

#### 4.2 Batas kenaikan-suhu normal pada daya pengenalan kontinu

Apabila transformator mempunyai belitan bersadapan dengan julat sadapan melebihi  $\pm 5\%$ , maka batas kenaikan-suhu harus diterapkan pada setiap sadapan pada daya sadapan, tegangan sadapan dan arus sadapan yang sesuai, lihat pasal 5.6 dari SNI 04-6954.1-2003. Rugi-rugi beban dan kadang-kadang rugi-rugi tanpa beban adalah berbeda untuk sadapan yang berbeda, yakni dalam julat sadapan yang variasi tegangan fluksi variabelnya ditentukan.

Jika uji jenis kenaikan-suhu akan dilakukan pada transformator yang seperti itu, jika tidak ditentukan lain, dilakukan pada 'sadapan arus maksimum', lihat pasal 5.3 SNI 04-6954.1-2003.

**CATATAN** Pada transformator belitan terpisah, sadapan arus maksimum biasanya adalah sadapan dengan rugi-rugi berbeban terbesar.

Pada oto-transformator dengan sadapan, pemilihan sadapan untuk pengujian kenaikan-suhu akan bergantung pada bagaimana sadapan-sadapan disusun.

Untuk transformator multi-belitan, persyaratan kenaikan-suhu mengacu pada daya pengenalan dalam semua belitan secara simultan jika daya pengenalan dari satu belitan sama dengan jumlah dari daya-daya pengenalan belitan lainnya. Jika hal ini tidak merupakan kasus, satu atau kombinasi pembebanan khusus harus dipilih dan ditentukan untuk uji kenaikan-suhu, lihat 5.2.3.

Pada transformator dengan susunan belitan konsentris, dua atau lebih belitan terpisah dapat disesuaikan dengan satu di atas yang lainnya. Dalam hal ini, batas suhu belitan harus diterapkan pembacaan rata-rata untuk belitan tersusun (*stacked*), jika belitan-belitan itu sama ukuran dan nilai pengenalnya. Jika belitan-belitan itu berbeda penilaian harus berdasarkan persetujuan.

Batas-batas kenaikan-suhu yang diberikan di bawah ini berlaku untuk transformator dengan isolasi padat yang dinyatakan sebagai 'kelas A' sesuai dengan IEC 85, dan direndam dalam minyak mineral atau cairan sintesis dengan titik nyala tidak melebihi 300°C (huruf kode pertama: O).



## SNI 04-6954.2-2004

Batas kenaikan-suhu transformator yang mempunyai sistem isolasi lebih tahan-suhu dan atau yang direndam dalam cairan yang sedikit mudah menyala (kode huruf K atau L) didasarkan kepada persetujuan.

Batas kenaikan-suhu untuk transformator jenis-kering dengan sistem isolasi berbeda diberikan dalam SNI 04-3870-1995.

Batas-batas berikut untuk kenaikan-suhu transformator terendam-minyak (kode huruf O) mengacu kepada kondisi ajek pada daya pengenalan kontinu. Batas-batas itu berlaku apabila hanya kondisi pelayanan normal dengan memperhatikan penerapan pendinginan, lihat 4.3.1 di bawah ini.

- |  |      |
|--|------|
| - Kenaikan suhu minyak bagian atas, lihat 5.3.1                              | 60 K |
| - Kenaikan suhu belitan rata-rata ( dengan pengukuran resistans, lihat 5.4 ) |      |
| - Untuk transformator yang diidentifikasi dengan ON ... atau OF...           | 65 K |
| - Untuk transformator yang diidentifikasi dengan OD ...                      | 70 K |

Tidak ada batas angka yang ditentukan untuk kenaikan-suhu inti, dari hubungan listrik di luar belitan, atau dari bagian struktur dalam tangki. Hal itu merupakan persyaratan yang dinyatakan tersendiri, namun bagian tersebut tidak akan mencapai suhu yang akan menyebabkan kerusakan terhadap bagian yang berdekatan atau di luar batas penuaan minyak. Untuk transformator besar hal ini dapat diselidiki dengan pengujian khusus, lihat lampiran B.

### 4.3 Persyaratan yang diubah karena kondisi pelayanan yang tidak normal

Jika kondisi pelayanan pada lokasi pemasangan yang dimaksudkan tidak didalam batas " kondisi pelayanan normal" maka batas kenaikan-suhu untuk transformator harus diubah.

Ketentuan untuk transformator jenis-kering diberikan pada pasal 2.2 dari SNI 04-3870-1995

#### 4.3.1 Transformator terendam-minyak berpendingin udara

Batas suhu sekitar normal ( $- 25^{\circ}\text{C}$  dan  $+ 40^{\circ}\text{C}$ ) untuk transformator tenaga diberikan pada 2.1. dari SNI 04-6954.1-2003. Dengan memperhatikan pendinginan dari transformator berpendingin udara, kondisi suhu pada tempat pemasangan yang dimaksudkan harus tidak melampaui :

- +  $30^{\circ}\text{C}$  rata-rata bulanan, dari bulan terpanas atau
- +  $30^{\circ}\text{C}$  rata-rata tahunan.

Jika kondisi suhu di lokasi pemasangan melebihi salah satu batas ini, batas kenaikan-suhu transformator semuanya harus dikurangi dengan jumlah yang sama dengan kelebihan tersebut.

Angka tersebut harus dibulatkan ke angka bulat terdekat dalam derajat.

CATATAN Suhu rata-rata diperoleh dari data meteorologi sebagaimana menurut SNI 04-6954.1-2003 definisi 3.12).

Suhu rata-rata bulanan :



Setengah dari jumlah rata-rata maksimum harian dengan rata-rata minimum harian selama bulan tertentu selama beberapa tahun.

Suhu rata-rata tahunan :

Seperdua belas dari jumlah suhu rata-rata bulanan.

Jika lokasi pemasangan lebih dari 1000 m di atas permukaan laut sedangkan pabriknya tidak, maka kenaikan suhu yang diizinkan selama pengujian di pabrik harus dikurangi sebagai berikut.

Untuk transformator berpendingin alami (... AN), batas kenaikan-suhu belitan rata-rata harus dikurangi dengan 1 K untuk setiap selang 400 m bila ketinggian pemasangan di atas 1000 m.

Untuk transformator berpendingin paksa (... AF), pengurangan harus 1 K untuk setiap 250 m.

Koreksi kebalikan yang sesuai dapat diterapkan dalam hal dimana ketinggian dari pabrik di atas 1000 m dan ketinggian lokasi pemasangan di bawah 1000 m.

Setiap koreksi ketinggian harus dibulatkan ke angka bulat terdekat dalam derajat.

Apabila batas kenaikan-suhu yang ditentukan dari transformator dikurangi, apakah karena suhu media pendingin yang tinggi atau karena pemasangan di tempat yang tinggi, hal ini harus tertera pada pelat pengenalan, lihat 7.2 dari SNI 04-6954.1-2003.

**CATATAN** Apabila transformator standar dipakai pada tempat yang tinggi, nilai pengurangan daya dapat dihitung, dari pendinginan dan kenaikan suhu sesuai dengan pelayanan dengan daya pengenalan pada kondisi sekitar normal.

#### **4.3.2 Transformator terendam-minyak berpendingin-air**

Suhu air pendingin normal yaitu sesuai dengan pasal 2.1 dari SNI 04-6954.1-2003 tidak melampaui +25°C. Jika suhu air pendingin melampaui batas ini, batas kenaikan-suhu yang ditentukan untuk transformator semuanya harus dikurangi dengan jumlah yang sama dengan kelebihan tersebut.

Angka-angka harus dibulatkan ke angka bulat terdekat dalam derajat.

Pengaruh perbedaan suhu sekitar atau ketinggian pendingin udara dari tangki diabaikan.

#### **4.4 Kenaikan-suhu selama siklus beban yang ditentukan**

Jika jaminan dan/atau uji khusus mengenai siklus beban ditentukan, hal ini harus mencakup parameter berikut :

- kondisi suhu mula transformator, pada suhu sekitar atau dengan kenaikan-suhu ajek sesuai dengan pembagian arus pengenalan yang ditentukan (sebelum pembebanan);
- besaran (konstanta) arus uji, dinyatakan sebagai kelipatan arus pengenalan, dan lamanya;
- nilai kenaikan-suhu maksimum yang diizinkan untuk minyak bagian atas dan belitan rata-rata (dengan resistansi) pada akhir pengujian. Pernyataan ini adalah bersifat



pilihan. Pengujian dapat dilakukan hanya sebagai informasi, tanpa ada batas yang disetujui sebelumnya;

- pengamatan atau pengukuran khusus yang dilakukan, misalnya pengukuran suhu titik panas secara langsung, gambaran panas dari pemanasan dinding tangki dan kemungkinan pembatasan dalam kaitannya dengan hal tersebut.

Untuk rekomendasi selanjutnya dan pembahasan mengenai studi siklus beban khususnya pengukuran dan penilaian, lihat B.4 dari lampiran B.

## **5 Uji kenaikan-suhu**

### **5.1 Umum**

Ayat ini menguraikan prosedur untuk penentuan suhu dan nilai kenaikan - suhu selama pengujian pabrik dan juga metode untuk mengganti beban pelayanan dengan prosedur uji yang ekuivalen.

Ayat tersebut memberikan persyaratan untuk pengujian transformator-terendam minyak dan transformator-jenis kering sesuai penerapannya.

Selama pengujian kenaikan-suhu, transformator harus dilengkapi dengan gawai proteksinya (misalnya, rele Bucholz pada transformator terendam-minyak). Setiap tanda-tanda selama pengujian harus dicatat.

#### **5.1.1 Suhu udara-pendingin**

Tindakan pencegahan seharusnya dilakukan untuk memperkecil variasi suhu udara pendingin, terutama selama bagian akhir dari waktu pengujian ketika kondisi ajek dicapai. Variasi pembacaan yang cepat karena turbulensi seharusnya dicegah dengan alat yang sesuai seperti pembuang panas (heat sinks) dengan konstanta waktu yang sesuai untuk sensor suhu. Paling sedikit harus digunakan tiga sensor. Pembacaan rata-rata seharusnya dilakukan untuk menilai pengujian. Pembacaan sebaiknya dilakukan pada selang waktu yang teratur, atau dapat menggunakan rekaman kontinu otomatis.

Sensor tersebut harus terdistribusi disekitar tangki berjarak 1 m sampai 2 m dari tangki atau permukaan pendingin, dan diproteksi terhadap radiasi panas langsung. Di sekitar transformator berpendingin-sendiri, sensor harus ditempatkan pada tingkat kira-kira berjarak setengah dari permukaan pendingin.

Transformator berpendingin-udara-paksa harus mempunyai sensor yang ditempatkan sedemikian rupa untuk merekam suhu yang benar dari udara yang mengalir kedalam pendingin. Harus diperhatikan terhadap kemungkinan sirkulasi balik dari udara panas. Benda uji harus ditempatkan sedemikian rupa untuk memperkecil rintangan terhadap aliran udara dan untuk memperoleh kondisi sekitar yang stabil.

#### **5.1.2 Suhu air-pendingin**

Tindakan pencegahan harus dilakukan untuk memperkecil variasi suhu air-pendingin selama periode pengujian. Suhu diukur pada saluran masuk pendingin. Pembacaan suhu dan kecepatan aliran air harus dilakukan pada selang waktu yang teratur, atau dapat menggunakan rekaman kontinu otomatis.



## 5.2 Metode uji untuk penentuan kenaikan-suhu

### 5.2.1 Umum

Untuk alasan praktis, metode standar untuk menentukan kenaikan suhu kondisi-ajek dari transformator terendam-minyak pada lantai uji adalah pengujian yang ekuivalen dalam hubungan hubung-singkat sesuai 5.5.2 di bawah ini.

Secara alternatif dapat disepakati dalam hal khusus untuk melakukan pengujian dengan mendekati tegangan dan arus pengenal dengan menghubungkan beban yang sesuai. Hal ini terutama dipakai untuk transformator dengan daya pengenal rendah.

Metode berpunggungan (*back to back*) dapat juga disepakati. Pada metode ini, dua transformator, satu adalah transformator yang diuji, ditempatkan paralel dan dieksitasi pada tegangan pengenal transformator yang diuji. Dengan rasio tegangan yang berbeda atau pemberian tegangan, arus pengenal dialirkan kepada transformator yang diuji.

Prosedur yang dapat dipakai untuk transformator-jenis kering diuraikan pada SNI 04-3858-1995 Transformator tenaga jenis kering

### 5.2.2 Uji kondisi ajek dengan metode hubung-singkat

Selama pengujian ini transformator tidak diberikan tegangan pengenal dan arus pengenal secara simultan, tetapi untuk menghitung rugi total, sebelumnya dengan mendapatkan dua macam rugi-rugi yang ditentukan secara terpisah, dinamakan rugi beban pada suhu acuan dan rugi tanpa-beban, lihat 10.4 dan 10.5 dari SNI 04-6954.1-2003.

Tujuan dari uji tersebut meliputi 2 hal :

- Untuk menetapkan kenaikan-suhu minyak bagian atas dalam kondisi ajek dengan disipasi dari rugi total.
- Untuk menetapkan kenaikan-suhu belitan rata-rata pada arus pengenal dan dengan kenaikan-suhu minyak bagian atas seperti yang ditetapkan di atas.

Hal ini diperoleh dengan 2 langkah :

#### a) Injeksi rugi total

Pertama kenaikan-suhu minyak bagian atas dan rata-rata ditetapkan ketika transformator dikenakan tegangan uji sedemikian rupa sehingga daya aktif yang terukur sama dengan rugi total dari transformator, lihat pasal 3.6, 10.4 dan 10.5 dari SNI 04-6954.1-2003. Arus uji diberikan di atas arus pengenal untuk menghasilkan rugi-rugi tambahan sama besar dengan rugi tanpa-beban, dan kenaikan-suhu belitan akan naik berkelanjutan.

Suhu minyak dan suhu media pendingin dimonitor dan pengujian dilanjutkan sehingga kenaikan-suhu minyak kondisi ajek dicapai.

Pengujian dapat dihentikan jika laju perubahan kenaikan suhu minyak bagian atas turun di bawah 1 K per jam dan tetap untuk periode 3 jam, jika pembacaan dilakukan tersendiri pada selang waktu tertentu, nilai rata-rata dari pembacaan selama 1 jam terakhir diambil sebagai hasil uji. Jika pencatat otomatis kontinu digunakan, diperoleh nilai rata-rata selama jam terakhir.



CATATAN Jika konstanta waktu kenaikan-suhu minyak tidak lebih dari 3 jam, kesalahan hitung dengan prosedur ini dapat diabaikan. Cara-cara perhitungan dijelaskan dalam lampiran C.

**b) Injeksi arus pengenalan**

Jika kenaikan-suhu minyak bagian atas telah tercapai, pengujian harus segera dilanjutkan dengan mengurangi arus sampai arus pengenalan untuk belitan terhubung kombinasi (untuk transformator multi-belitan lihat 5.2.3). Kondisi ini dipertahankan selama 1 jam dengan pengamatan kontinu dari suhu minyak dan suhu tengah pendingin.

Pada akhir jam pengamatan resistans belitan diukur, baik setelah saat pemutusan cepat dari suplai dan hubung-singkat (lihat 5.5 dan C.2 dan C.3 dalam lampiran C), atau tanpa pemutusan suplai dengan cara metode superposisi yang terdiri dari injeksi arus searah pengukuran yang nilainya rendah pada belitan yang disuperimposekan pada arus beban.

CATATAN 1 Penggunaan arus searah yang disuperimposekan untuk pengukuran resistans belitan dijelaskan dalam IEC 279.

Nilai suhu rata-rata dua belitan ditentukan dari resistans sesuai dengan 5.4.

Selama jam pengujian dengan arus pengenalan, suhu minyak akan turun. Oleh karena itu nilai yang diukur dari suhu belitan akan naik dengan jumlah yang sama sebesar nilai kenaikan-suhu minyak rata-rata setelah turun dari nilai yang sebenarnya, ditentukan sesuai dengan prosedur a) di atas. Nilai suhu belitan yang dikoreksi dikurangi dengan suhu media pendingin minyak pada akhir periode injeksi rugi total adalah merupakan kenaikan-suhu rata-rata belitan.

CATATAN 2 Dengan memperhatikan perhitungan suhu dengan beban variable, adalah sangat tepat untuk menganggap kenaikan suhu belitan merupakan jumlah dari kedua bentuk : kenaikan-suhu minyak rata-rata (di atas suhu tengah pendingin) ditambah selisih antara suhu belitan rata-rata dan suhu minyak rata-rata (lihat 5.6 dan B.2 serta B.3 dalam lampiran B).

Dengan persetujuan, dua langkah pengujian dapat dikombinasikan pada satu langkah penerapan tunggal dengan daya pada tingkat antara rugi beban dan rugi total.

Angka kenaikan-suhu minyak atas dan belitan harus ditentukan dengan menggunakan koreksi 5.6. Daya yang diinjeksikan selama pengujian harus sekurang-kurangnya 80 % dari nilai rugi total.



### 5.2.3 Modifikasi pengujian untuk transformator khusus

Transformator dua-belitan dengan julat sadapan lebih besar dari  $\pm 5\%$ .

Jika tidak ditentukan lain, pengujian kenaikan-suhu transformator dilakukan dengan transformator terhubung pada 'sadapan arus maksimum' (lihat 5.3 SNI 04-6954.1-2003) dan arus sadapan untuk sadapan tersebut digunakan pada bagian akhir pengujian (lihat sub-ayat 5.2.2b)).

Rugi total yang diinjeksikan selama awal pengujian (lihat 5.2.2a) harus sama dengan nilai tertinggi dari rugi total yang timbul pada setiap sadapan (sesuai dengan besaran sadapannya). Sadapan ini juga seringkali tetapi tidak selalu merupakan sadapan arus maksimum. Bagian pengujian ini menentukan kenaikan-suhu minyak bagian atas. Untuk menentukan kenaikan-suhu pada belitan arus maksimum, angka kenaikan-suhu minyak yang digunakan dalam evaluasi harus dikaitkan dengan rugi total pada sadapan tersebut. Nilai awal dari pengujian dihitung kembali jika diperoleh data yang lain.

Transformator multi – belitan

Dalam bagian awal dari pengujian, rugi total harus dihasilkan berkaitan dengan daya pengenalan (atau daya sadapan) pada semua belitan, jika daya pengenalan dari satu belitan sama dengan jumlah daya pengenalan dari belitan yang lain.

Jika ini tidak berlaku, ada kasus pembebanan yang ditentukan dengan kombinasi perbedaan dari masing-masing beban belitan. Hal tersebut akan digabungkan dengan rugi total tertinggi yang harus ditentukan daya uji untuk penentuan kenaikan-suhu minyak.

Angka kenaikan-suhu untuk masing-masing belitan di atas suhu minyak harus diperoleh dengan arus pengenalan dalam belitan.

Dalam menentukan kenaikan-suhu belitan di atas kenaikan suhu sekitar, kenaikan suhu minyak untuk pembebanan yang relevan akan dihitung kembali dari uji injeksi rugi total, sesuai dengan 5.6, demikian juga kenaikan-suhu belitan di atas minyak setiap belitan, apabila dapat diterapkan.

Petunjuk untuk perhitungan kembali rugi-rugi dalam transformator multi-belitan diberikan dalam IEC 606.

Injeksi rugi total untuk penentuan kenaikan-suhu minyak dapat dilakukan :

- sedapat mungkin mendekati pembebanan aktual, dengan menginjeksikan arus yang bersesuaian pada rugi total dalam satu belitan, pada sisi lain dengan hubung-singkat secara simultan atau dihubungkan dengan suatu impedans.
- atau secara pendekatan, dengan cara tidak menghubungkan-singkat atau tidak menghubungkan belitan tertentu, sebagai contoh jika salah satu belitan mempunyai daya pengenalan relatif rendah dan kontribusi terhadap rugi total transformator juga rendah, belitan tersebut dibiarkan dalam keadaan terbuka dan menaikkan arus dalam belitan lainnya sampai rugi total sebenarnya tercapai.

Jika tidak ada metode di atas yang dapat digunakan sepenuhnya, karena keterbatasan fasilitas uji, maka diperbolehkan melakukan pengujian dengan rugi yang dikurangi sampai 80% dari nilai yang sebenarnya. Kemudian nilai suhu yang diukur dikoreksi menurut 5.6.

Penjelasan rinci mengenai uji kenaikan-suhu untuk transformator multi-belitan harus dilakukan sesuai dengan aturan yang ada dan disetujui pada saat diadakan tender.



### **5.3 Penentuan suhu minyak**

#### **5.3.1 Minyak bagian atas**

Suhu minyak bagian atas ditentukan dengan satu atau lebih sensor yang terendam minyak di bagian atas tangki, di kantong termometer atau di penghubung atas tangki dengan radiator terpisah atau pendingin terpisah. Penggunaan dari beberapa sensor khususnya penting pada transformator besar dan pembacaannya harus dirata-rata untuk mendapatkan nilai suhu yang benar.

**CATATAN** Suhu minyak dapat berbeda pada tempat yang berbeda di bagian atas tangki, bergantung pada desainnya. Pengukuran menggunakan kantong termometer dapat terganggu oleh pemanasan arus eddy pada tutup transformator. Pada transformator dengan sirkulasi minyak paksa pada perlengkapan pendinginnya, terdapat campuran minyak dari belitan dengan minyak pintas dalam tangki, yang kemungkinan tidak seragam antara bagian bagian yang berbeda dari tangki atau antar penghubung sirkuit pendingin yang berbeda. Mengenai arti penting dari suhu minyak bagian atas dalam transformator dengan sirkulasi paksa lihat lampiran A.

#### **5.3.2 Minyak bagian bawah dan minyak rata-rata**

"Minyak bagian bawah" adalah suatu istilah yang berarti (suhu dari) minyak yang memasuki belitan pada bagian bawah. Untuk alasan praktis, diidentifikasi dengan suhu dari minyak yang kembali dari perlengkapan pendingin ke tangki. 'Minyak rata-rata adalah konsep yang digunakan untuk koreksi dari hasil uji kenaikan-suhu tertentu, lihat 5.2.2 dan 5.6. Minyak rata rata juga digunakan dalam model matematik untuk memprediksi suhu dalam pelayanan beban spesifik, konstan atau variabel, lihat lampiran B.

Suhu minyak bagian bawah ditentukan oleh sensor yang dipasang pada penghubung balik dari pendingin atau radiator. Jika beberapa deretan peralatan pendingin dipasang maka lebih dari satu sensor yang digunakan.

**CATATAN** Aliran minyak dalam penghubung balik mungkin turbulensi, jika dipaksa dengan pompa, atau sebagian besar laminar, jika sirkulasi alami melalul radiator. Hal ini penting untuk penentuan dari suhu minyak pada penghubung.

Suhu minyak rata-rata pada prinsipnya adalah harus merupakan suhu rata-rata dari minyak pendingin dalam belitan. Untuk tujuan penilaian pengujian, biasanya diambil sebagai rata-rata antara suhu minyak bagian atas dan suhu minyak bagian bawah, ditentukan seperti dijelaskan di atas.

**CATATAN 1** Untuk transformator ONAN sampai 2500 kVA, dengan tangki datar atau gelombang atau saluran pendinginan tersendiri dipasang langsung pada tangki, kenaikan-suhu minyak rata-rata di atas suhu udara sekitar dapat ditentukan 80 % dari kenaikan-suhu minyak bagian atas.

**CATATAN 2** Untuk tujuan selain dari penilaian pengujian, suhu minyak rata-rata dapat ditentukan dengan cara yang berbeda, lihat lampiran A.

### **5.4 Penentuan suhu belitan rata- rata**



Suhu belitan rata-rata ditentukan melalui pengukuran resistans belitan. Pada transformator fase-tiga, pengukuran sebaiknya dipilih yang dihubungkan dengan inti transformator tengah. Rasio antara nilai resistans  $R_2$  pada suhu  $\theta_2$  (derajat C) dan  $R_1$  pada  $\theta_1$  ditentukan seperti :

$$\text{Tembaga : } \frac{R_2}{R_1} = \frac{235 + \theta_2}{235 + \theta_1} \qquad \text{Aluminium : } \frac{R_2}{R_1} = \frac{225 + \theta_2}{225 + \theta_1}$$

Pengukuran acuan ( $R_1, \theta_1$ ) dari semua resistans belitan dilakukan terhadap transformator pada suhu sekitar, pada kondisi-ajek, lihat 10.2.3 SNI 04-6954.1-2003. Apabila resistans  $R_2$  diukur pada suhu yang berbeda, maka hasil nilai suhu :

$$\text{Tembaga} \qquad \theta_2 = \frac{R_2}{R_1} = (235 + \theta_1) - 235$$

$$\text{Aluminium} \qquad \theta_2 = \frac{R_2}{R_1} = (225 + \theta_1) - 225$$

Suhu media pendingin eksternal pada waktu pemutusan adalah  $\theta_a$ .

Kenaikan-suhu belitan, akhirnya :

$$\Delta \theta_w = \theta_2 - \theta_a$$

Apabila resistans belitan diukur setelah pemutusan suplai daya dan sambungan hubung-singkat dengan nilai resistans  $R_2$  , segera sebelum pemutusan, harus ditentukan sesuai dengan 5.5.

## 5.5 Penentuan suhu belitan sebelum pemutusan

Uji kenaikan-suhu (lihat 5.2.2), mensyaratkan bahwa suhu belitan rata-rata saat pemutusan harus ditentukan. Metode standar adalah sebagai berikut :

Segera setelah memutuskan suplai daya untuk pengujian dan melepaskan penyambung hubung-singkat, sirkuit pengukuran arus searah dihubungkan melalui belitan fase yang diukur. Belitan mempunyai konstanta waktu listrik  $L/R$  yang besar. Pembacaan yang akurat diperoleh hanya setelah penundaan waktu tertentu. Resistans dari belitan bervariasi sesuai dengan waktu selama penurunan suhu belitan. Resistans harus diukur dengan waktu yang cukup untuk membolehkan ekstrapolasi balik terhadap saat pemutusan.

Rekomendasi untuk pelaksanaan pengukuran yang rinci dan metode alternatif yang dapat digunakan dengan menguntungkan dalam hal khusus diberikan dalam lampiran C.

Agar memperoleh koreksi hasil yang setepat mungkin, kondisi pendinginan sebaiknya mengalami gangguan sekecil mungkin saat pengukuran resistans dilaksanakan. Masalah ini, sehubungan dengan transformator terendam-minyak pendinginan- paksa, dibicarakan selanjutnya dalam lampiran A.

## 5.6 Koreksi



Jika nilai daya dan arus yang ditentukan tidak diperoleh selama pengujian, hasilnya harus dikoreksi sesuai dengan hubungan berikut. Nilai-nilai tersebut berlaku dalam julat  $\pm 20\%$  dari nilai target daya dan  $\pm 10\%$  dari nilai target arus. Dengan persetujuan nilai-nilai tersebut dapat diterapkan melebihi julat yang lebar, lihat B2 pada lampiran B.

Kenaikan-suhu minyak di atas suhu sekitar, selama pengujian dikalikan dengan :

$$\left[ \frac{\text{rugi total}}{\text{rugi uji}} \right]^x$$

$x = 0,8$  untuk transformator distribusi (pendinginan alami, daya pengenal maksimum 2 500 kVA).

$x = 0,9$  untuk transformator yang lebih besar dengan pendinginan ON ...

$x = 1,0$  untuk transformator dengan pendinginan OF... atau OD...

Kenaikan-suhu belitan rata-rata di atas suhu minyak rata-rata selama pengujian dikalikan dengan :

$$\left[ \frac{\text{arus pengenal}}{\text{arus uji}} \right]^y$$

$y = 1,6$  untuk transformator berpendingin ON ... dan OF ...  
 $y = 2,0$  untuk transformator berpendingin OD ...



## Lampiran A (informatif)

### Catatan pada suhu minyak dalam transformator dengan sirkulasi minyak paksa

Pada transformator ... ON, laju volume aliran minyak keadan-ajek yang mengalir melalui belitan pada prinsipnya sama dengan jumlah aliran yang melalui radiator. Pada umumnya, merupakan pegangan yang sama untuk transformator OD... hanya kebocoran yang diizinkan atau dikontrol dengan mengeluarkan pendingin ke dalam tangki bebas. Kondisi yang berbeda atau dengan kata lain, transformator dengan pendinginan OF... secara tidak langsung mengalir melalui belitan.

Pada transformator OF..., kapasitas pompa penuh harus cukup untuk memenuhi laju aliran melalui belitan dalam pembebanan lebih yang dibatasi. Pada beban pengenalnya dan beban sebagian dapat kelebihan laju aliran yang lumayan melalui pendingin yang dihubungkan "shunt" di luar belitan dalam tangki. Aliran "shunt" tersebut secara perlahan menaik dengan suhu yang tidak berubah, sampai ke permukaan dimana minyak panas dari bagian atas belitan dikeluarkan.

Aliran panas dari minyak bercampur secara turbulen dengan pendingin, yaitu minyak saluran "shunt" pada tangki. Volume dari batas saluran keluar belitan hingga bagian atas tangki diisi dengan campuran minyak yang mempunyai suhu relatif homogen, lebih rendah dari pada suhu minyak yang meninggalkan bagian atas belitan.

Pengukuran konvensional suhu minyak bagian atas akan menunjukkan suhu minyak campuran ini. Jika pengukuran digunakan untuk menentukan suhu minyak rata-rata belitan, dan perbedaan suhu antara belitan dan minyak, hasil pengukuran tersebut tidak realistis dan dapat meragukan jika digunakan untuk perhitungan suhu titik-panas dan untuk studi kemampuan pembebanan.

Metode alternatif untuk menentukan suhu-minyak dalam belitan kadang-kadang disebut sebagai "suhu minyak rata-rata yang diekstrapolasi". Sesuai dengan metode ini pengamatan suhu belitan rata-rata dengan pengukuran resistans setelah menghentikan uji kenaikan-suhu dilanjutkan selama beberapa waktu tambahan. Laju perubahan pengurangan nilai resistans dalam kurun waktu 5 menit sampai 20 menit. Selanjutnya bila tidak ada lagi disipasi rugi di dalam belitan, maka suhunya akan mendekati suhu minyak sekitar. Maka disumsikan secara langsung bahwa suhu minyak rata-rata dapat dianggap tidak berubah (atau hanya turun perlahan secara bertahap terhadap suhu seluruh volume minyak di dalam transformator). Asumsi ini tidak mendasar. Untuk beberapa desain metode tersebut memberikan hasil yang sangat tidak realistis.

Kenyataannya, tidak ada metode yang universal dan andal untuk menentukan 'suhu minyak sekitar' pada transformator OF... yang didasarkan hanya pada pengukuran resistans eksternal terhadap belitan.

Pada 5.5 ditunjukkan bahwa kondisi pendinginan akan terganggu walaupun sekecil mungkin ketika pengukuran suhu belitan dilaksanakan setelah pemutusan. Sebelum pemutusan, volume minyak bebas di sekitar belitan mempunyai "suhu minyak bagian bawah". Belitan dialiri minyak pada suhu ini. Pendingin menerima minyak dari volume minyak campuran pada bagian atas tangki, di atas minyak belitan yang keluar.

Setelah pemutusan daya untuk pengujian, sirkulasi minyak dapat diteruskan dengan cara yang berbeda :



- Jika sirkulasi pompa dan ventilasi kipas digunakan, pendingin selanjutnya menarik campuran minyak dan mengalirkan minyak dengan suhu sebesar suhu minyak bagian bawah ke tangki. Secara berurutan, suhu campuran minyak mulai turun, dan suhu minyak bagian bawah mengikuti suhu ini secara bertahap.
- Jika sirkulasi pompa digunakan tetapi kipas dimatikan, pendingin akan mengalirkan minyak dengan suhu yang hampir sama dengan suhu minyak bagian atas pada bagian bawah tangki dimana suhu minyaknya akan naik dan bercampur secara bebas di sekitar belitan.
- Jika pompa dan kipas kedua-duanya dimatikan, belitan terus menyuplai minyak panas pada bagian atas tangki. Batas pemisah antara minyak bagian atas dengan minyak bagian bawah dimulai dari penyerap panas di bawah batas pemisah saluran minyak keluar dari belitan. Secara berurutan hal ini mengubah ujung termal (thermal head) dari minyak di dalam tangki di luar belitan dan mempengaruhi aliran ke atas dari minyak di dalam belitan.

Pada umumnya lebih disukai mempertahankan pompa dan kipas beroperasi, tetapi perbedaan hasil uji tentu saja mungkin berbeda, tanpa perlu membandingkan dengan ketidakpastian dari distribusi suhu minyak dalam belitan seperti yang dijelaskan di atas.





**Lampiran B**  
**(Informatif)**  
**Pembebanan transien-Model matematik dan pengujian**

### **B.1 Umum**

Hasil uji kenaikan-suhu untuk keadaan ajek, sesuai 5.2 dapat digunakan untuk memperkirakan kenaikan-suhu keadaan-ajek pada pembebanan yang berbeda, dan juga untuk memperkirakan kenaikan-suhu transien (jika konstanta waktu-termal transformator diketahui).

Untuk transformator ukuran kecil dan medium perkiraan tersebut dilakukan menurut model matematik konvensional yang diuraikan dalam B.2 dan B.3 di bawah.

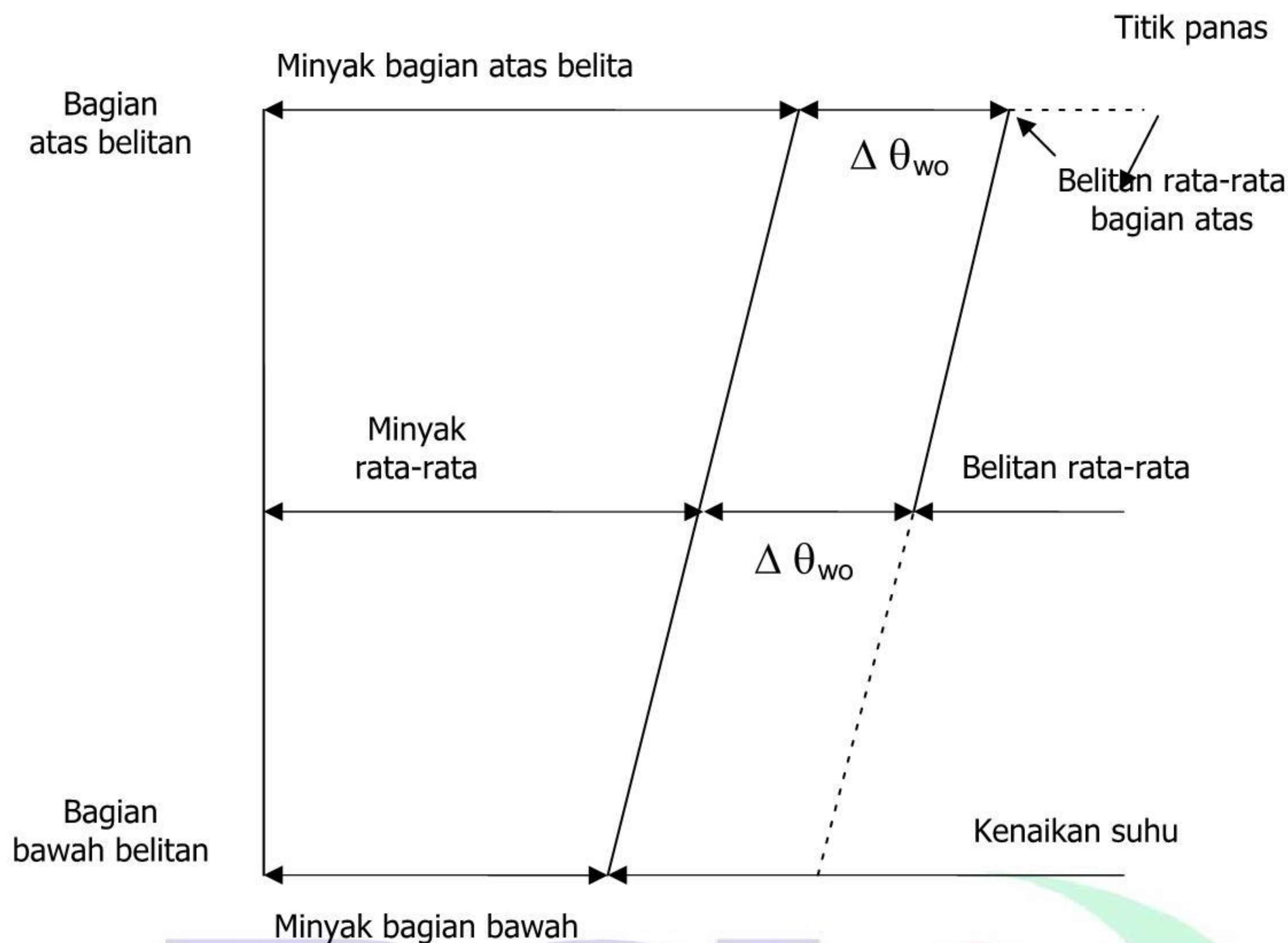
Namun keabsahan model ini untuk transformator khusus ukuran besar, tidak begitu pasti sebagaimana halnya untuk transformator tenaga dengan daya pengenal lebih rendah. Apabila analisa kemampuan pembebanan dilakukan, misalnya, mengenai pembebanan darurat di atas daya pengenal, disarankan untuk memperoleh data yang relevan untuk transformator yang diuji. Salah satu cara adalah menggunakan uji khusus dengan beban transien melebihi daya pengenal. Rekomendasi untuk prosedur uji yang sesuai dan untuk pengukuran serta pengamatan terkait diberikan dalam B.4

### **B.2 Model matematik untuk distribusi suhu dalam belitan transformator terendam – minyak – Konsep titik – panas**

Minyak pendingin memasuki bagian bawah belitan dan berada pada 'suhu minyak bagian bawah'. Minyak tersebut mengalir ke atas melalui belitan dan suhu minyak ini diasumsikan naik secara linier terhadap ketinggian. Rugi- rugi belitan dipindahkan dari belitan ke minyak di sepanjang belitan.

Perpindahan panas ini memerlukan turunnya suhu antara belitan dan minyak sekitarnya yang diasumsikan sama besar pada semua tingkat ketinggian. Dalam grafik, gambar B.1, suhu belitan dan suhu minyak akan terlihat sebagai dua garis paralel.





**Gambar B1 Model distribusi suhu**

Suhu maksimum yang terjadi pada setiap bagian sistem isolasi belitan disebut “suhu titik-panas”. Parameter ini diasumsikan untuk memberikan batas termal dari pembebanan transformator. Sebagai ketentuan umum, bagian-bagian lain transformator seperti, busing, transformator arus atau pengubah sadapan, dipilih sedemikian rupa sehingga tidak mengakibatkan pembatasan yang lebih sempit dari kemampuan – pembebanan transformator, lihat 4.2 SNI 04-6954.1-2003.

Kearah ujung atas belitan umumnya terkonsentrasi rugi-rugi arus eddy dan belitannya dapat dilengkapi dengan isolasi listrik tambahan yang dapat menaikkan isolasi termal. Perbedaan suhu lokal sebenarnya antara konduktor dan minyak diasumsikan lebih tinggi dari “faktor titik panas”. Faktor ini diasumsikan dari 1.1 untuk transformator distribusi sampai 1.3 untuk transformator tenaga ukuran medium. Dalam transformator kapasitas besar terdapat variasi yang cukup besar bergantung pada desain, dan pabrikan harus diminta keterangan, kecuali jika dilakukan pengukuran sebenarnya, misalnya sesuai seksi B.4 di bawah ini.

Perbedaan suhu keadaan-ajek antara belitan dan minyak, rata-rata sepanjang belitan, diperoleh sebagai perbedaan antara (suhu rata-rata belitan dengan pengukuran resistans) dan (suhu minyak rata-rata) masing masing lihat 5.4 dan 5.3.

Kenaikan suhu titik panas keadaan-ajek di atas suhu media pendingin eksternal (udara atau air) adalah jumlah dari (kenaikan suhu minyak bagian atas di atas media pendingin) dan (faktor titik panas) X (selisih suhu rata-rata belitan terhadap minyak)



Dalam transformator dengan aliran minyak tidak-langsung paksa (kode OF ....) konsep suhu minyak bagian atas dan suhu minyak rata-rata adalah berbeda sepanjang konsep belitan tersebut didasarkan hanya pada pengukuran menurut 5.3 dan 5.4 (lihat lampiran A.)

Nilai yang terukur dari kenaikan suhu keadaan-ajek pada pembebanan khusus digunakan untuk menghitung kenaikan suhu yang bersesuaian pada pembebanan yang berbeda dari cara eksponen yang diberikan dalam 5.6. Ini adalah nilai tipikal berkenaan dengan variasi yang bergantung pada desain, dan berlaku dengan ketelitian hanya dalam julat terbatas dari variasi pembebanan. Butir 5.6 menentukan batas yang agak sempit untuk maksud evaluasi hasil uji yang berkenaan dengan garansi. Untuk mengestimasi ketelitian yang moderat, eksponen dapat memberikan hasil yang bermanfaat diatas julat yang lebih besar.

### **B.3 Pembebanan atau pendinginan yang variable. Konstanta-waktu termal**

Bila pembebanan bervariasi, atau bila intensitas pendinginan paksa diubah, suhu belitan dan minyak akan mengikuti dengan sedikit penundaan. Ini secara konvensional diuraikan dengan dua konstanta-waktu. Salah satunya mencerminkan kapasitas panas kalorimeter dari transformator keseluruhan (dimana kapasitas bohang dari massa minyak yang berperan pada bagian yang dominan). Pada umumnya berorde 1 jam sampai 5 jam lebih singkat untuk transformator besar, kompak, transformator berpendingin paksa dan lebih lama untuk transformator berpendingin alami. Konstanta waktu lainnya adalah lebih pendek dari orde 5 menit sampai 20 menit, dan mencerminkan bagaimana beda suhu antara belitan dan minyak sesuai pada perubahan rugi-rugi yang didisipasi.

Dalam kondisi yang variable yang merespon kenaikan-suhu belitan diatas suhu pendinginan udara atau air dinyatakan sebagai penjumlahan kenaikan-suhu minyak, bergantung pada konstanta-waktu panjang, dan kenaikan-suhu-belitan di atas minyak, bergantung pada konstanta-waktu pendek. Ekspresi matematik untuk variasi suhu transien terhadap waktu dinyatakan dalam IEC 354.

Model matematik untuk transformator jenis kering dinyatakan dalam publikasi SNI 04-3859-1995.

### **B.4 Rekomendasi untuk uji kenaikan-suhu dengan beban transien**

Seperti dijelaskan dalam 4.4 bagian standar ini disetujui untuk melakukan pengujian kenaikan-suhu dengan pembebanan di atas arus pengenalan untuk durasi waktu yang terbatas. Uji semacam itu, sebagai contoh yang dimaksudkan untuk mensimulasikan periode beban puncak selama sehari dalam pelayanan darurat.

Pengujian pembebanan yang direkomendasikan terdiri dari arus konstan dinyatakan sesuai dalam per unit arus pengenalan dan dengan durasi spesifik setelah arus uji diputus. Pengujian tersebut dijalankan dalam hubungan hubung-singkat dengan cara yang sama seperti pengujian keadaan ajek pada beban pengenalan (nilai arus beban tertentu dapat dipilih termasuk kelonggaran untuk rugi-rugi tanpa beban).

Perhitungan mengenai siklus beban yang aktual dapat digunakan untuk contoh sesuai pedoman yang diberikan dalam IEC 354. Untuk memverifikasikan padanan mendekati ekuivalen dari siklus beban yang sederhana dinyatakan dalam hal suhu maksimum. Pengujian ini ditentukan apakah pengujian harus dimulai dalam keseluruhan transformator pada suhu sekitar lantai uji, atau didalam kondisi suhu bersesuaian dengan kondisi-ajek pada arus "beban awal" yang ditentukan, lagi dapat sesuai, dinyatakan sebagai bagian dari arus pengenalan.



Sensor suhu harus dipasang sekurang-kurangnya pada kedudukan yang sama seperti disyaratkan sehingga diperlukan untuk kenaikan suhu sampai kondisi-ajek. Suhu minyak dan belitan (rata-rata, dengan resistans) pada waktu padam ditentukan dengan metode standar. Sensor suhu tambahan di dalam tangki transformator dapat digunakan sesuai perjanjian. Bila sensor dipasang di dalam sistem belitan yang digunakan dalam upaya untuk mencatat suhu titik panas belitan, disarankan menggunakan beberapa sensor pada waktu yang sama. Hali ini disebabkan karena lokasi yang tepat dari titik terpanas umumnya tidak diketahui sebelumnya. Suhu lokal dapat bervariasi dari titik ke titik dan juga terhadap waktu, bergantung pada varlasi acak dari aliran minyak, dapat juga diketahui bahwa pengukuran sebenarnya suhu setempat pada transformator besar dapat menyimpang sesuai perkiraan menurut model matematik konvensional yang diuraikan dalam seksi B.2 dan di dalam publikasi IEC 354. Kecuali diperoleh dari pengalaman sebelumnya dan dari pengukuran pada desain yang serupa, studi dapat dianggap sebagai penyelidikan untuk memperhatikan kemungkinan penentuan spesifikasi batas-batas suhu sebelumnya.

Pemonitoran suhu lokal dari tangki dan terminasi listrik dengan teknik kamera inframerah dapat dilakukan dengan maksud mengurangi resiko kerusakan selama pengujian. Pemonitoran suhu dari bagian struktur logam bagian dalam dengan menggunakan sensor yang dipasang sementara dapat digunakan untuk maksud yang sama. Analisis gas-dalam-minyak sebelum dan sesudah pengujian adalah metode diagnostik untuk mengetahui penyebab panas lebih (lihat C.4)





**Lampiran C**  
**(Informatif)**  
**Teknik yang digunakan dalam pengujian kenaikan-suhu dari**  
**transformator terendam - minyak**

### C.1 Pemenggalan pengujian pada kondisi ajek

Daftar simbol

$\theta$	Suhu dalam °C
$\theta(t)$	Suhu minyak yang berubah terhadap waktu (minyak bagian atas atau minyak rata-rata)
$\theta_a$	Suhu media pendingin eksternal (air udara sekitar atau) dianggap konstan
$\Delta\theta$	Kenaikan suhu minyak di atas $\theta_a$
$\theta_u, \Delta\theta_u$	Nilai-nilai suhu tertinggi dalam kondisi-ajek
$\varepsilon(t)$	Penyimpangan tertinggi dari nilai kondisi-ajek $\theta_u$
$T_o$ $h$	konstanta waktu untuk variasi eksponensial dari kenaikan suhu minyak ter tinggi interval waktu antara pembacaan
$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	Tiiga pembacaan suhu secara berurutan dengan interval waktu $h$ satu sama lainnya

Pada prinsipnya pengujian harus kontinu, hingga kenaikan suhu kondisi-ajek (minyak) ditetapkan. Suhu udara ruang, atau suhu air pendingin sedapat mungkin harus dijaga konstan. Hal tersebut dianggap bahwa suhu minyak  $\theta(t)$  akan mendekati nilai tertinggi  $\theta_u$  sepanjang fungsi eksponensial suatu konstanta waktu  $T_o$ . Suhu ruang adalah  $\theta_a$ . Kenaikan suhu minyak tertinggi adalah  $\theta_u$ .

$$\theta_u = \theta_a + \Delta\theta_u \quad (1)$$

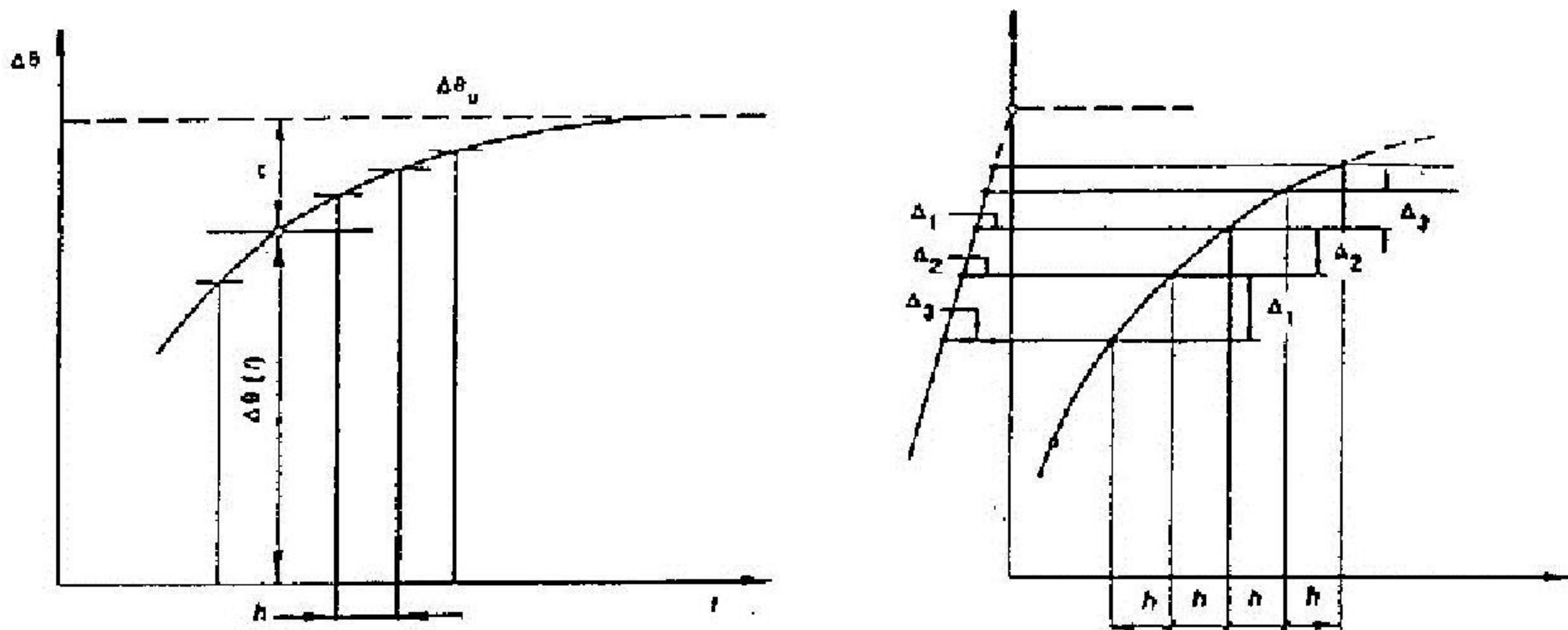
$$\theta(t) = \theta_a + \Delta\theta_u (1 - e^{-t/T_o}) \quad (2)$$

Penyimpangan akhir kondisi ajek adalah

$$\varepsilon(t) = \theta_u - \theta(t) = \Delta\theta_u \times e^{-t/T_o} \quad (3)$$

Nilai  $\varepsilon$  pada interval waktu yang sama akan berbentuk seri geometri. Hal ini memperbolehkan suatu prosedur ekstrapolasi secara grafik sesuai gambar C.1





**Gambar C.1 Grafik ekstrapolasi untuk kenaikan suhu tertinggi**

Untuk tiap dua titik yang berurutan pada kurva dengan pemisahan waktu dalam  $h$  (jam):

$$\Delta(\Delta\theta)_t = \varepsilon_{t-h} \varepsilon_t = \varepsilon_t (e^{h/T_o} - 1) \quad (4)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta(\Delta\theta)_t}{(e^{h/T_o} - 1)} \quad (4a)$$

Pada setiap waktu berikutnya ( $t + t_1$ )

$$\varepsilon_{(t+t_1)} = \varepsilon_t e^{-t_1/T_o} = \frac{\Delta(\Delta\theta)_t}{e^{t_1/T_o} (e^{h/T_o} - 1)} \quad (5)$$

Kriteria konvensional untuk bagian terpotong adalah untuk mengamati bila laju perubahan suhu turun di bawah 1 K per jam, sebagai contoh :

$$h = 1 \text{ dan } \Delta(\Delta\theta)_t < 1 \quad \text{Persamaan (4a) memberikan :}$$

$$\varepsilon_t < (e^{1/T_o} - 1)^{-1}$$

Pengujian kemudian akan berlangsung 3 jam dan kemudian dapat dihentikan. Kenaikan suhu rata-rata selama jam terakhir diambil sebagai hasil pengujian.

Dengan  $T_o = 3$  h secara teoritis menimbulkan kesalahan potongan kira-kira 1 K, jika konstanta waktu dipersingkat, kesalahan diperkecil dan sebaliknya.

Konstanta waktu  $T_o$  dapat diperkirakan dengan cara yang berbeda :

Rumus berikut didasarkan pada keterangan yang ada pada pelat pengenalan transformator



$$T_0 \frac{5 \times (\text{massa total}) + 15 \times (\text{massa minyak})}{(\text{rugi total})} \times \left( \frac{\Delta\theta_u}{60} \right) \text{jam} \quad (6)$$

dimana :

massa dalam ton dan rugi dalam kilowatt

$\Delta\theta_u$  adalah perkiraan awal kenaikan suhu minyak baglan atas.

Massa minyak dalam konservator harus dikurangi massa total minyak karena tidak mengambil bagian dalam perubahan suhu.

Suatu perkiraan berdasarkan percobaan dari konstanta waktu selama pengujian dapat dilakukan dengan pembacaan suhu secara berturut-turut pada interval waktu  $h$  yang sama.

Diberikan tiga pembacaan berturut-turut  $\Delta\theta_1$ ,  $\Delta\theta_2$ ,  $\Delta\theta_3$ , jika hubungan eksponensial, persamaan (2) adalah suatu pendekatan kurva suhu yang baik kemudian kenaikannya akan mempunyai hubungan berikut

$$\frac{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1}{\Delta\theta_3 - \Delta\theta_2} = e^{h/T_0}$$

$$T_0 = \frac{h}{\ln \frac{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1}{\Delta\theta_3 - \Delta\theta_2}} \quad (7)$$

Pembacaan juga mengijinkan suatu prediksi kenaikan suhu akhir

$$\Delta\theta_u = \frac{(\Delta\theta_2)^2 - \Delta\theta_1 \Delta\theta_3}{2\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1 - \Delta\theta_3} \quad (8)$$

Perkiraan berturut-turut akan dibuat dan akan konvergen. Untuk mencegah kesalahan acak numerik interval waktu  $h$  harus mendekati  $T_0$  dan  $\Delta\theta_3 / \Delta\theta_u$  harus tidak kurang dari 0,95.

Nilai kenalkan suhu kondisi-aiek yang lebih akurat diperoleh dengan suatu metode kuadrat terkecil dari ekstrapolasi semua titik yang diukur di atas kira-kira 60% dari  $\Delta\theta_u$  ( $\Delta\theta_u$  diperkirakan dengan metode tiga titik).

Formulasi numerik lainnya adalah :

$$\Delta\theta_u = \Delta\theta_2 + \frac{\sqrt{(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1) - (\Delta\theta_3 - \Delta\theta_2)}}{\ln \frac{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1}{\Delta\theta_3 - \Delta\theta_2}} \quad (9)$$

## C.2 Prosedur penukuran resistans belitan setelah pemutusan

Butir 5.5 dari standar ini menunjukkan bahwa suhu belitan pada akhir pengujian sampai kondisi ajek biasanya ditentukan dengan pengukuran resistans belitan. Pengukuran dimulai



setelah pemutusan daya uji dan menghubungkan kembali belitan dari sumber daya uji a.b ke sumber arus pengukuran a.s.

Suhu belitan dan resistansnya bervariasi terhadap waktu, dan masalahnya adalah ekstrapolasi mundur terhadap waktu saat pemutusan. Prosedur ekstrapolasi dijelaskan dalam C.3.

Pengukuran resistans dimulai sesegera mungkin setelah menghubungkan belitan ke peralatan ukur. Pada awalnya pembacaan tidak benar karena jatuh tegangan induktif dalam belitan, sebelum arus pengukuran a.s distabilkan.

Waktu yang diperlukan untuk menstabilkan berkurang dengan:

- Menggerakkan inti ke keadaan saturasi sedemikian rupa sehingga induktans efektif turun dari nilai "tanpa beban" ke nilai yang sama dari besaran induktans hubung - singkat;
- Menggunakan suplai arus konstan-sebuah sumber arus yang distabilkan secara elektronik atau baterai berdaya penuh dengan tambahan resistor seri yang besar.

Membuat inti ke keadaan saturasi berarti membangkitkan besarnya fluksi (dimensi : volt x detik). Pengguna e.m.f yang tinggi dalam sirkit mengurangi penundaan waktu, dalam prakteknya dapat mengurangi beberapa detik.

Kedua belitan dari pasangan yang diuji dapat dihubungkan pada dua sirkit a.s terpisah atau dihubungkan seri pada satu rangkaian bersama. Dalam kedua kasus, arah arus dibuat bekerja sama untuk menjenuhkan inti.

Konstanta-waktu listrik dari sirkit a.s, setelah saturasi dicapai, dapat juga diturunkan ke tingkat beberapa detik, bahkan dalam kondisi sulit. Perbedaan suhu 1 K bersesuaian dengan perbedaan relatif dari resistans dalam 1/300, jika untuk untuk penurunan eksponensial dari kesalahan, akan bersesuaian dengan penundaan waktu terhadap lima sampai enam kali konstanta waktu listrik, ini semua berarti bahwa pengukuran yang sempurna akan diperoleh di dalam lebih dari 1 menit setelah saturasi efektif ditetapkan.

Ada juga metode lain dalam penggunaan khusus. Salah satunya mengambil komponen induktif dari tegangan belitan berbeda yang terbuka, dan bukan bagian dari sirkit arus a.s, dan menggunakan tegangan ini untuk mengoreksi tegangan yang melalui belitan resistans yang diukur.

Jika dua belitan benar-benar seimbang, setengah paralel dari belitan yang ada, dimungkinkan mengalirkan arus a.s kesalah satu dan kembali melalui yang lain pada satu sama lain dan sebaliknya. Belitan yang diizinkan ini memonitor resistans, dalam prinsipnya tanpa pengaruh induktif, dan memungkinkan jika menggunakan daya a.b di suplai ke transformator.

### **C.3 Ekstrapolasi suhu belitan sampai pemutusan**

Ayat C.2 dari lampiran ini menjelaskan sirkit suplai a.s untuk pengukuran resistans dan penundaan waktu sebelum pengaruh induktif sudah menghilang.

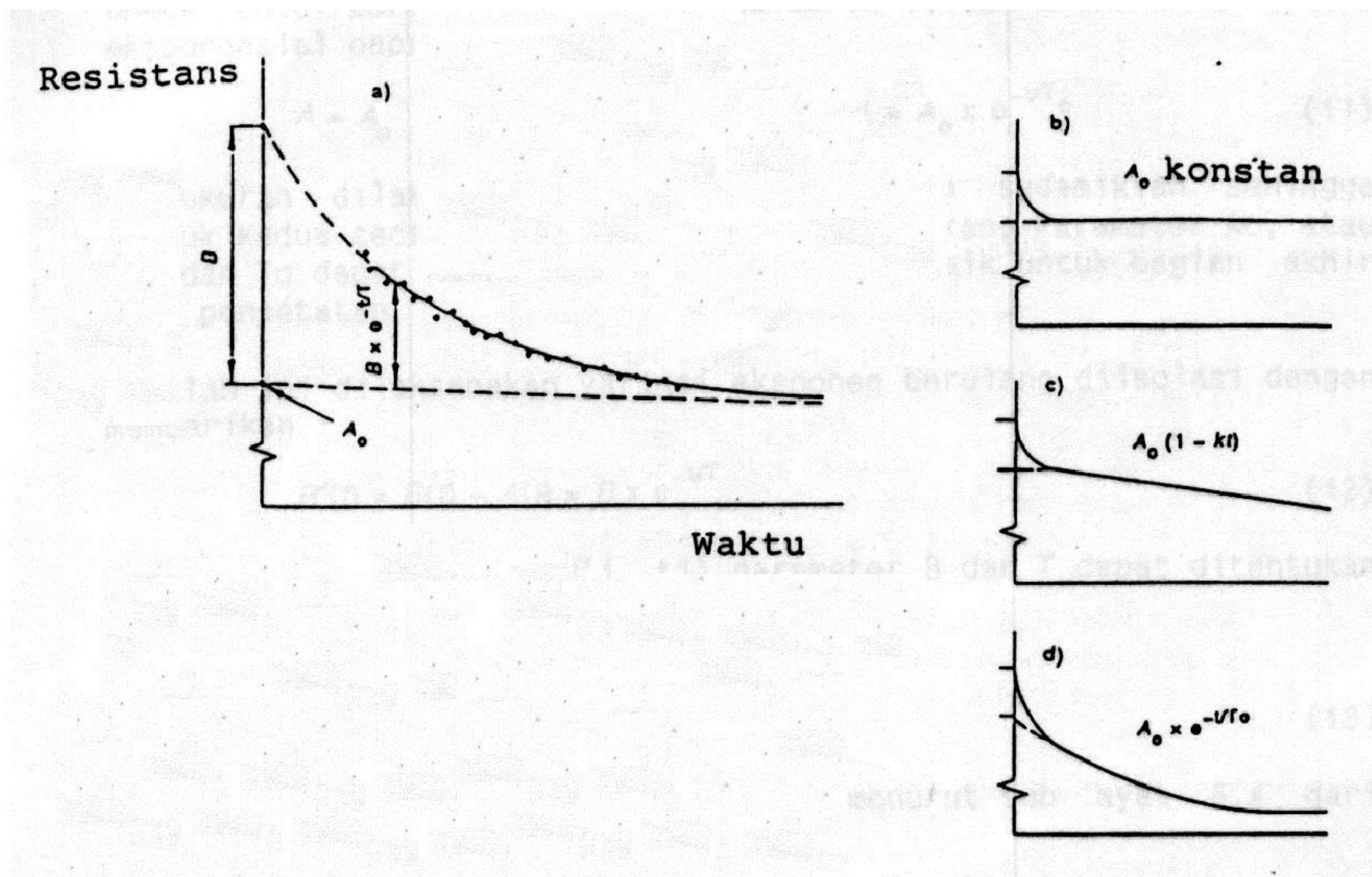
Instrumentasi yang digunakan untuk pengukuran dapat untuk pembacaan manual atau untuk pencatatan otomatis, analog atau digital. Sejumlah besar pembacaan diskrit diperoleh selama periode, katakanlah 20 menit, dan pembacaan ini harus dievaluasi untuk ekstrapolasi mundur dalam waktu sampai saat pemutusan.



Pembacaan dapat dilihat dalam gambar C2. Gambar ini menunjukkan bahwa suhu belitan bervariasi relatif secara cepat untuk periode beberapa menit dan kemudian menjadi rata.

Pada transformator dengan konstanta waktu termal besar untuk variasi suhu minyak (ini diterapkan terutama pada transformator ON....transformator dengan daya pengenal relatif rendah) dapat diasumsikan bahwa asimtot adalah nilai konstan.

Dalam hal lain (khususnya bila transformator tenaga besar dengan pendinginan paksa diuji, dan perlengkapan pendingin dibiarkan beroperasi setelah daya uji diputuskan lihat lampiran A), mungkin diperlukan untuk menetapkan penurunan asimtot, yang padanya variasi awal yang lebih cepat. Gambar C.2 mengilustrasikan ini.



a) Bagian awal dari pencatatan, dengan penurunan suhu cepat

b) c) d) Model matematik alternatif untuk penurunan lambat berikutnya.

**Gambar C2 Evaluasi variasi resistans belitan setelah pemutusan**

Evaluasi yang cocok dilakukan dengan menggunakan prosedur komputer numerik, yang sesuai dengan fungsi analitis untuk kumpulan pembacaan tertentu. Pembahasan di bawah ini hanya mengilustrasikan prinsip umum.

Variasi resistans  $R$  dengan waktu  $t$  diinterpretasikan sebagai kombinasi dari suatu bentuk  $A$  yang tetap atau bervariasi secara lambat dan bentuk lain yang menggambarkan eksponensial curam dari nilai  $B$  dengan konstanta-waktu  $T$  :

$$R(t) = A(t) + B x e^{-t/T} \quad (10)$$



Untuk bentuk pertama, suatu konstan, suatu penurunan linier, atau penurunan eksponensial dapat digunakan :

$$A = A_0 \quad A = A_0 (1 - kt) \quad A = A_0 \times e^{-t/T_0} \quad (11)$$

Penukuran dilakukan untuk jangka waktu sedemikian rupa sehingga bentuk kedua secara praktis telah hilang. Parameter  $A_0$ , atau dari  $k$ , atau  $A_0$  dan  $T_0$  dengan begitu dapat kemudian diestimasi cukup baik untuk bagian akhir pencatatan.

Setelah ini dilaksanakan variasi eksponensial yang cepat diisolasi dengan memberikan :

$$R'(t) = R(t) - A(t) = B \times e^{-t/T} \quad (12)$$

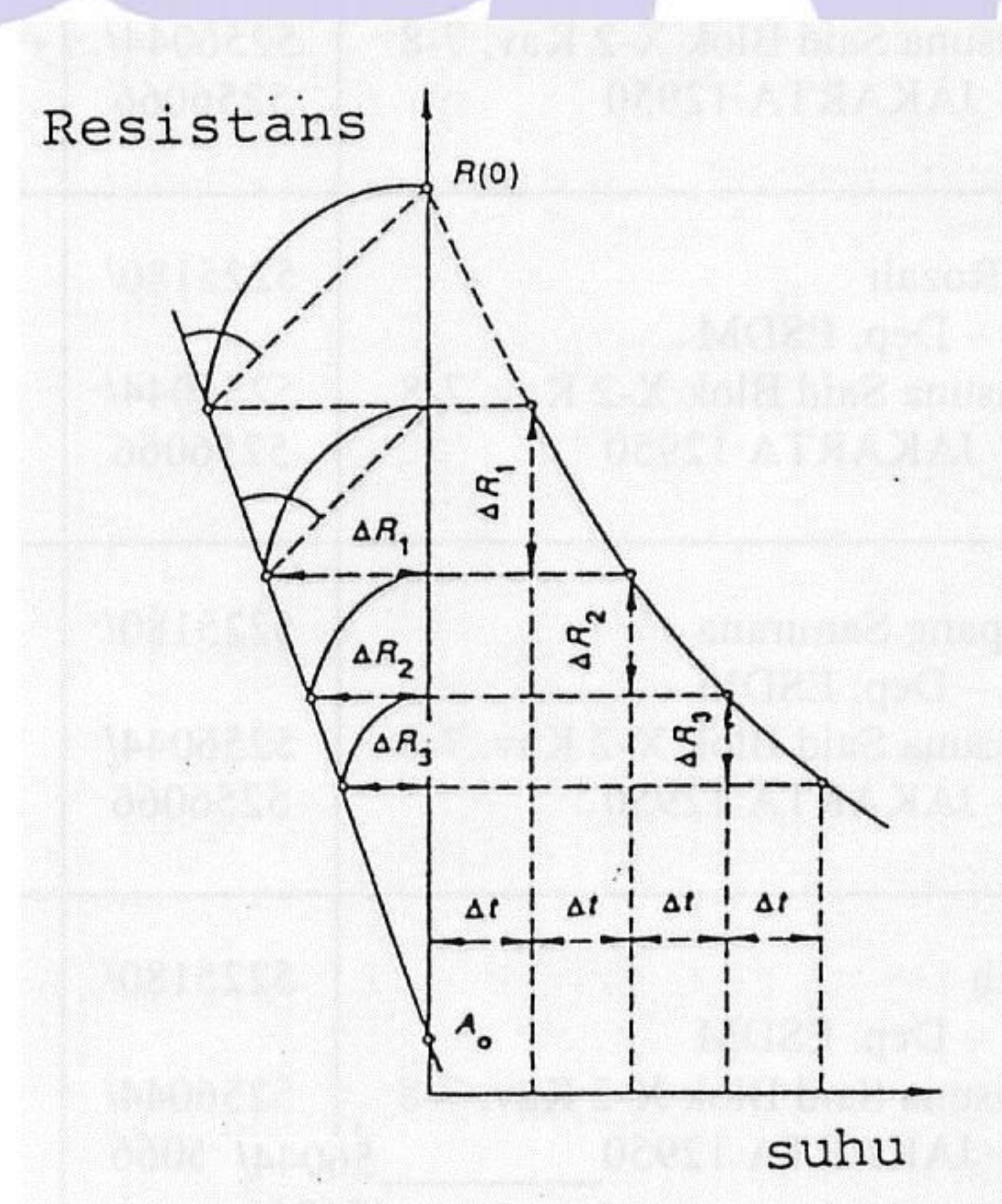
Kepada kumpulan nilai  $(R'_i, t_i)$  parameter  $B$  dan  $T$  ditentukan dari beberapa prosedur regresi numerik.

Hasil estimasi, dengan begitu:

$$R(0) = A_0 + B \quad (13)$$

dari persamaan di atas suhu rata-rata belitan dihitung menurut 5.4 dari bagian standar ini.

Prosedur ekstrapolasi grafik konvensional untuk maksud yang sama menggunakan sebuah gambar yang diperhalus secara manual. Perpotongan dibuat pada interval waktu yang sama, dimulai dari saat pemutusan . Selisih resistans harus berbentuk seri geometris, jika kurva penurunan adalah eksponensial. Garis miring dari grafik dibuat, seperti yang diperlihatkan dalam gambar C.3. Garis ini cenderung ke perpotongan yang bersesuaian dengan parameter  $A_0$  (gambar C.3) dan, pada ujung lain juga memungkinkan estimasi secara grafik dari  $R_0$ .



**Gambar C.3 Ekstrapolasi grafik untuk nilai resistans pada saat pemutusan**



#### C.4 Analisis gas-dalam-minyak

Analisis kromatografik dari kandungan gas di dalam minyak dapat digunakan untuk kepentingan mendeteksi kemungkinan pemanasan lebih lokal yang tidak terlihat seperti kenaikan suhu abnormal selama pengujian.

Analisis seperti itu pada umumnya mengindikasikan pemanasan lebih lunak dari belitan atau baglan struktur, sebutlah 107°C sampai 200°C, pemanasan-lebih lokal yang serius, sebut 300°C sampai 400°C, misalnya kontak yang tidak disengaja yang membawa sirkulasi arus eddy.

Analisis gas dalam minyak secara khusus direkomendasikan untuk transformator tenaga besar, karena pengaruh hamburan fluksi adalah faktor resiko yang potensial yang meningkat sesuai ukuran.

Teknik pengujian dijelaskan kemudian dalam kelompok kerja CIGRE, Electra No 82, May 1982, halaman 33 sampai 40.















**BADAN STANDARDISASI NASIONAL - BSN**  
Gedung Manggala Wanabakti Blok IV Lt. 3,4,7,10  
Jl. Jend. Gatot Subroto, Senayan Jakarta 10270  
Telp: 021- 574 7043; Faks: 021- 5747045; e-mail : [bsn@bsn.go.id](mailto:bsn@bsn.go.id)